

Аннотация к циклу работ на конкурс ОИЯИ 2022

По разделу научно-исследовательские экспериментальные работы

Исследование механизмов реакций нуклонных передач при энергиях до 10 МэВ/нуклон

*Ажибеков А., Исатаев Т., Лукьянов С.М., Маслов В.А., Мендибаев К., Науменко М.А.,
Пенионжкевич Ю.Э., Скобелев Н.К., Шахов А.В.*

Целью настоящего цикла работ являлось изучение особенностей ядерных реакций передачи нуклонов и влияние структуры ядер, образующихся в выходных каналах реакции на механизм реакций. Исследовалась структура ядер, образующихся в реакциях передачи нуклонов.

Использование реакций многонуклонных передач является эффективным методом получения и изучения структуры экзотических ядер. Впервые для этого реакции многонуклонных передач использовались в ЛЯР ОИЯИ в экспериментах группы Волкова В.В., в которых было получено более десятка новых ядер на границах нейтронной стабильности. Между тем, нужно отметить, что сечения реакций передач, приводящих к образованию экзотических ядер в основном состоянии, могут быть очень малы [1].

Диапазон сечений простирается от нескольких нанобарн до микробарн. Все это накладывает определенные условия на экспериментальную методику: необходимость измерения продуктов под передними углами, высокую эффективность используемых спектрометров, высокое разрешение по массе и заряду образующихся в реакции продуктов, возможность сепарации продуктов реакции и ядер первичного пучка. Оценку сечений реакций синтеза ядер в области границы нуклонной стабильности сделать достаточно трудно.

Для исследования реакций многонуклонных передач была создана экспериментальная установка, включающая в себя камеру рассеяния с логарифмическими полупроводниковыми детекторами-телескопами (толщиной 10, 50, 100 и 3500 мкм). Телескопы размещались вблизи мишени с возможностью поворота вокруг нее в широком диапазоне углов. Это позволяло идентифицировать и измерять энергетические и угловые распределения продуктов реакций передач с высоким угловым и энергетическим разрешением. Измерения под передними углами осуществлялись с помощью магнитного анализатора высокого разрешения МАВР, что позволяло проводить идентификацию продуктов реакций по A и Z с абсолютной точностью.

Проведенные исследования показали, что при взаимодействии слабосвязанных кластерных ядер в характеристиках их взаимодействия с ядрами-мишенями проявляются особенности их кластерной структуры. В реакции ^{18}O (10 МэВ/нуклон)+Ta с

использованием магнитного анализатора МАВР был обнаружен механизм многонейтронной передачи. Как показано в работах [3,4], возможен процесс передачи 4-х нейтронов, поскольку самый нейтронно-избыточный наблюдаемый изотоп кислорода с массой $A=22$.

Интересная возможность изучения структуры ядер и даже получения изомерных состояний обнаружена в реакции с пучком ионов ${}^3\text{He}$. В ядерных реакциях на пучке ${}^3\text{He}$ наблюдались продукты-изобары, ${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He},t){}^{45}\text{Ti}$, ${}^{197}\text{Au}({}^3\text{He},t){}^{197}\text{Hg}$. Сечения образования наблюдаемых изобар могли быть объяснены последовательным обменом протона и нейтрона, так называемой реакцией перезарядки. В реакции ${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He},t){}^{45}\text{Ti}$ были измерены основное и возбужденные состояния в ядре ${}^{45}\text{Ti}$, включая заселение изобар-аналогового состояния. Изучение реакций ${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He},t){}^{45}\text{Ti}$ и ${}^{197}\text{Au}({}^3\text{He},t){}^{197}\text{Hg}$ показало, что их механизм можно объяснить реакциями зарядового обмена, в которых наблюдается двухтельный характер обмена энергией.

В представленном цикле работ дается подробный анализ полученных результатов и объясняются некоторые закономерности в механизмах реакций передачи нуклонов с точки зрения динамики реакций со слабосвязанными ядрами, как радиоактивными, так и стабильными. Часть работ посвящена теоретическому анализу полученных результатов. С теоретической точки зрения в низкоэнергетических ядро-ядерных столкновениях передача нуклонов (и/или их перераспределение) может играть важную роль и проявляться как непосредственно в каналах нуклонных передач, так и в изменении потенциальной энергии системы, что в свою очередь приводит к изменению сечений отдельных каналов и полного сечения реакции по сравнению с моделью с неизменной в ходе столкновения нуклонной плотностью. Передачи отдельных нуклонов при столкновениях с участием легких ядер требуют более точного квантового описания, которое возможно на основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера для волновых функций нуклонов (кластеров) в среднем поле ядер, движущихся по классическим траекториям. Были проведены расчеты сечений для процессов передачи (срыва и подхвата) нейтрона в реакциях с ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{He} + {}^{45}\text{Sc}$ и ${}^3\text{He} + {}^{197}\text{Au}$), ${}^6\text{He}$ (${}^6\text{He} + {}^{45}\text{Sc}$, ${}^6\text{He} + {}^{65}\text{Zn}$ и ${}^6\text{He} + {}^{197}\text{Au}$), и ${}^{18}\text{O}$ (${}^{18}\text{O} + {}^{181}\text{Ta}$). Исследованы зависимости сечений образования изотопов ${}^{44,46}\text{Sc}$, ${}^{65}\text{Zn}$, ${}^{196,198}\text{Au}$ от энергии бомбардирующих ядер и структуры ядер-мишеней. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными по сечениям образования указанных изотопов при совместном учете процессов передачи нейтрона и процессов слияния-испарения в рамках статистической модели.

Таким образом, была реализована и создана экспериментальная методика, включающая в себя полупроводниковые спектрометры и магнитный анализатор,

позволившая с большим разрешением и эффективностью измерять продукты в реакциях с пучками ^3He , ^6He , ^{18}O . Показано, что структура ядер существенно влияет на механизмы передачи нейтронов, в частности, в реакциях с ядром ^6He наблюдаются большие сечения передачи нейтронов при энергиях вблизи кулоновского барьера. Используемая теоретическая модель позволила объяснить полученные результаты и дала хорошее согласие экспериментальными данными.

Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем исследовании процессов передачи нуклонов и/или кластеров, что позволит анализировать результаты экспериментальных исследований реакций с легкими, экзотическими и радиоактивными ядрами, полученные как в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова (ЛЯР) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна, так и в других научных центрах, а также использовать их для предсказания результатов и планирования новых экспериментов.

Исследования, представленные в данном цикле работ, проводились в коллаборации с институтами стран-участниц ОИЯИ: Институт ядерной физики (Ржеж, Чехия), Институт ядерной физики (Алматы, Казахстан), Национальный университет им. Гумилева (Астана, Казахстан). Представленный на конкурс цикл работ опубликован в виде 12 статей в рецензируемых журналах и доложен на многих международных конференциях. Только в 2021-2022 годах результаты цикла были представлены на следующих конференциях:

1. IV International Scientific Forum “Nuclear Science and Technologies”, Almaty, Kazakhstan, September 26-30, 2022.
2. 28th International Nuclear Physics Conference (INPC 2022), Cape Town, South Africa, September 11-16, 2022.
3. The LXXII International conference "NUCLEUS-2022. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", Moscow, July 11-16, 2022.
4. XI Conference of Young Scientists and Specialists “Alushta-2022”, Alushta, June 5-12, 2022.
5. XLIV Intern. conf. “Nuclear Science”, St. Paulo, Brazil, November 9-12, 2021.
6. The XXV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, AYSS-2021, Almaty, Kazakhstan, October 11-15, 2021.
7. XXIIInd Colloque GANIL, Autrans-Meaudre en Vercors, France, September 26-October 1, 2021.
8. III International Scientific Forum “Nuclear Science and Technologies”, Almaty, Kazakhstan, September 20-25, 2021.

9. The LXXI International conference "NUCLEUS-2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", St. Petersburg, September 20-25, 2021.
10. The 7th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications "ANIMMA 2021", Prague, Czech Republic, June 21-25, 2021.

**Список работ, представляемых на конкурс ОИЯИ 2022
(сектор №7 ЛЯР)**

- 1) Yu.E. Penionzhkevich, R.G. Kalpakchieva.
Light Exotic Nuclei Near the Boundary of Neutron Stability.
World Scientific (Singapore, 2022),.
- 2) N.K. Skobelev, Yu.E. Penionzhkevich, I. Sivacek, T. Issatayev, G. D'Adata, V. Burjan, A.I. Kilic, J. Mrazek, V. Glagolev.
Population of Excited States in ^{45}Ti Nuclei in Charge Exchange Reactions in a 29-MeV ^3He Beam.
Phys. Part. Nucl. 53 (2022) 382.
- 3) A.K. Azhibekov, Yu.E. Penionzhkevich, S.M. Lukyanov, T. Issatayev, V.A. Maslov, K. Mendibayev, M.A. Naumenko, N.K. Skobelev, K.A. Kuterbekov, A.M. Mukhambetzhan.
Dynamics of the Neutron Transfer Process in the Reaction $^{181}\text{Ta}(^{18}\text{O}, ^{19}\text{O})$ at an Energy of 10 MeV per Nucleon.
Phys. At. Nucl. 84 (5) (2021) 635.
- 4) A.K. Azhibekov, V.A. Zernyshkin, V.A. Maslov, Yu.E. Penionzhkevich, K. Mendibayev, T. Issatayev, M.A. Naumenko, N.K. Skobelev, S.S. Stukalov, D. Aznabaev.
Differential Production Cross Sections for Isotopes of Light Nuclei in the $^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta}$ Reaction.
Phys. At. Nucl. 83 (2) (2020) 93.
- 5) N.K. Skobelev, Yu.E. Penionzhkevich, V. Burjan, J. Mrazek.
Charge Exchange Reactions on Low-Energy Particle Beams.
Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 84 (4) (2020) 425.
- 6) Yu.E. Penionzhkevich, S.M. Lukyanov, A.K. Azhibekov, M.A. Naumenko, T. Issatayev, I.V. Kolesov, V.A. Maslov, K. Mendibayev, V.A. Zernyshkin, K.A. Kuterbekov, A.M. Mukhambetzhan.
Neutron Transfer in Reaction $^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta}$ with Formation of Neutron-Rich Oxygen Isotopes.
J. Phys. Conf. Ser. 1555 (1) (2020) 012031.
- 7) N.K. Skobelev.
Effect of the Structure of Light Loosely Bound Nuclei on the Mechanisms of Nuclear Reactions.
Phys. At. Nucl. 82 (4) (2019) 358.
- 8) Yu.E. Penionzhkevich.
Special Features of Nuclear Reactions Involving Loosely Bound Cluster Nuclei.
Phys. At. Nucl. 82 (3) (2019) 224.

- 9) V.V. Samarin, Yu.E. Penionzhkevich, M.A. Naumenko, N.K. Skobelev.
Nucleon Transfer in Reactions $^3\text{He} + ^{194}\text{Pt}$, ^{45}Sc within Time-Dependent Approach.
Eurasian J. Phys. Funct. Mater. 3 (1) (2019) 31.
- 10) V.V. Samarin, Yu.E. Penionzhkevich, M.A. Naumenko, N.K. Skobelev, Yu.G. Sobolev.
Dynamics of Nucleus-Nucleus Collisions and Neutron Rearrangement in Time-Dependent Approach.
Nuovo Cimento Soc. Ital. Fis. 42 C (2019) 105.
- 11) V.V. Samarin, Yu.E. Penionzhkevich, M.A. Naumenko, N.K. Skobelev.
Near-Barrier Proton Transfer in Reactions with ^3He Nucleus.
Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 82 (6) (2018) 637.
- 12) M.A. Naumenko, V.V. Samarin, Yu.E. Penionzhkevich, N.K. Skobelev.
Near-Barrier Neutron Transfer in Reactions with ^3He Nucleus.
Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 80 (3) (2016) 264.